

$$\text{где } \varphi = \frac{2 \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)}{\left(1 - \frac{\Delta L}{a}\right)} \cdot 2,4; \quad a = 2\sqrt{\rho \Delta S};$$

$$\Delta L = L_c - L.$$

В результате получен способ расчета напряженно-деформированного состояния заготовки при обжиге тонкостенных трубных заготовок, позволяющий определить момент как окружной, так и осевой потери устойчивости.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПОГРАНИЧНЫХ СЛОЕВ И РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

© 2012 Шквар Е.А., Мовчан В.Т., Козлова Т.В.

Национальный авиационный университет, Киев

## MATHEMATICAL MODELING OF TURBULENT BOUNDARY LAYERS AND DEVELOPMENT OF COMBINED METHODS OF TURBULENCE STRUCTURE CONTROL.

© 2012 Shkvar Ye.A., Movchan V.T., Kozlova T.V.

The set of effective turbulence models for boundary layers, developing under the influence of control methods, has been developed. Special attention was given to taking into account the possibilities to combine several methods of control for getting the ability to predict the cumulative result of these combinations. The elaborated models allow to optimize the characteristics of these combinations for their mutual effect improving.

Потребности авиационной отрасли, связанные с необходимостью создания конкурентоспособной техники и ее эффективной эксплуатации, требуют постоянного усовершенствования технологий расчетного определения аэродинамических характеристик как отдельных элементов летательных аппаратов, так и полных компоновок. Одним из ключевых направлений развития современных методов математического моделирования параметров обтекания тел заданной геометрии является разработка соответствующих моделей турбулентности, обеспечивающих надежное теоретическое определение характеристик как разнообразных пограничных слоев, так и различных, в том числе и отрывных сдвиговых течений. Настоящее исследование посвящено разработке моделей коэффициента турбулентной вязкости, объединенных общим принципом построения и ориентированных на решение указанных

задач. Предложено несколько вариантов алгебраических и дифференциальных моделей турбулентной вязкости [1], а также комбинированный подход [2], объединяющий эти два типа моделей на основе зонального принципа. Общей идеей является построение моделей на основе асимптотических свойств гиперболического тангенса. Получены единые по всей толщине сдвигового слоя распределения турбулентной вязкости и турбулентной теплопроводности, удобные при построении на их основе расчетных методов, а также аппроксимации ряда определяющих характеристик турбулентного движения в пристеночной и внешней областях пограничного слоя, таких как: напряжение трения, кинетическая энергия турбулентности, скорость ее диссипации. Предложен подход по адаптации разработанных модельных представлений к задачам управления турбулентными течениями, позволивший учесть влияние инъекции

растворов полимерных добавок, продольного рифления, продольного и поперечного оребрения обтекаемой поверхности, а также наличие устройств разрушения крупномасштабных вихревых структур

турбулентности (Large Eddy Break Up devices – LEBU). Кроме того, рассмотрена тепловая задача и вдув-выдув через обтекаемую поверхность. Разработаны высокоэффективные и устойчивые к возмущениям конечно-разностные расчетные методы пристеночных сдвиговых течений как при наличии преобладающего направления их развития, так и при локальном его отсутствии. На этой основе был выполнен значительный объем параметрических расчетов, позволивший продемонстрировать возможности воспроизведения структурных особенностей, присущих рассмотренным течениям как в двумерной, так и в пространственной постановках в соответствии с известными экспериментальными данными в широком диапазоне геометрических параметров и режимных условий. Проведено численное моделирование ряда турбулентных течений, в том числе: градиентных пограничных слоев; пристенных струй, формирующихся в спутном потоке либо при его отсутствии; двухфазных сдвиговых течений несмешивающихся либо смешивающихся сред, а также сдвиговых слоев, развивающихся при наличии распределенного либо локализованного тепло-массообмена через обтекаемую поверхность.

Значительное внимание при тестировании разработанных подходов уделено моделированию влияния ряда средств управления турбулентными пограничными слоями, в том числе применению устройств LEBU, оребрению обтекаемой поверхности, инъекции полимерных добавки их систем, локальному периодическому выдуву-отсосу, а также комбинированному использованию нескольких управляющих факторов. Представлены и проанализированы результаты математического моделирования

турбулентных течений, формирующихся в бороздках продольно профилированной обтекаемой поверхности за LEBU, а также в случае действия ряда различных комбинаций управляющих воздействий. Рис. 1

иллюстрирует результаты математического моделирования турбулентного пограничного слоя, формирующегося на продольно обтекаемом теле вращения ( $d = 10 \text{ мм}$ ) за установленным LEBU [2]: (a) – профили скоростей в различных сечениях вдоль направления развития течения, (b) – профили осредненной продольной (c) – распределение локального коэффициента трения  $C_f = 2\tau_w / (\rho u_\infty^2)$  вдоль продольной координаты  $x$ .

Анализ результатов проведенных численных исследований построенного семейства моделей турбулентности позволил определить пределы применимости каждой из разработанных модификаций по отношению к классам изученных течений и условиям их формирования, а также сформулировать вывод о том, что они адекватно описывают рассмотренные типы течений не хуже традиционно применяемых в настоящее время моделей других авторов. В случае применения разработанных гибридных подходов к построению моделей турбулентности последние демонстрируют несомненное преимущество в случае решения задач, связанных с моделированием эффектов управления пристенными течениями и, прежде всего, в случае изучения и оптимизации схем комбинированного использования нескольких управляющих воздействий.



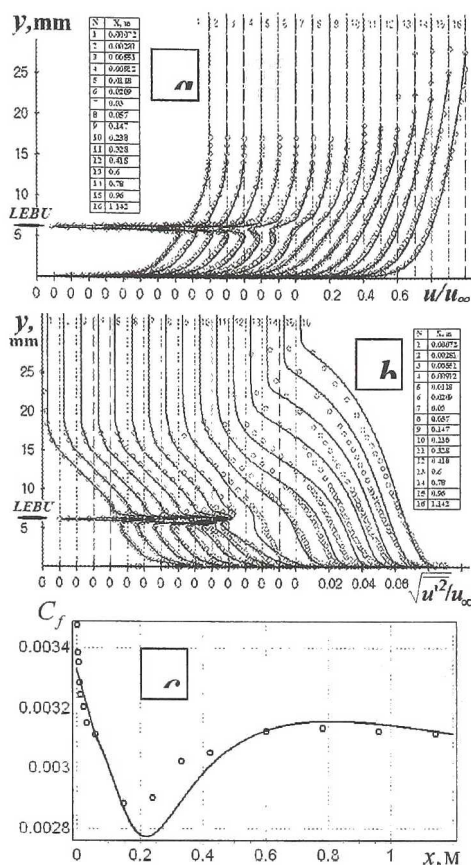


Рис. 1. Моделирование управления турбулентным пограничным слоем посредством LEBU: кружки – экспериментальные данные В.И.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мовчан В.Т. Разноуровневые математические модели коэффициента турбулентной вязкости / В.Т.Мовчан, Е.А.Шквар // Прикладная гидромеханика. – К.: ИГМ. – 2010. – Т. 12 (84), №1. – С. 55–67.
2. Корнилов В.И. Моделирование турбулентных пограничных слоев на теле вращения при наличии разрушителей крупных вихрей / В.И.Корнилов, Е.А.Шквар // Теплофизика и аэромеханика. – Изд-во ИТТФ СО РАН №3. – 2010. – С. 335–348.

## ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА FLOWVISION В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ АЭРОДИНАМИКИ САМОЛЕТА

© 2012 Шмелев В.В.

ООО “ТЕСИС”, Москва

## INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN FLOWVISION SOFTWARE FOR AIRCRAFT AERODYNAMIC PROBLEMS

© 2012 Schmelev V.V.

In current presentation innovative technologies of **FlowVision HPC** software are discussed. **FlowVision HPC** is based on the finite volume approach to the solution of the aerodynamic problems and exploits rectangular adaptive mesh with local refinement.

В докладе обсуждаются инновационные технологии программного комплекса **FlowVision HPC**, основанного на конечно-объемном методе решения уравнений аэродинамики и использующего прямоугольную

адаптивную сетку с локальным измельчением.

В частности:

- использование технологии подсеточного разрешения геометрии для аппроксимации криволинейной геометрии с повышенной точностью, которая